

张 壮,刘建明,于昌明,等.综合地球物理方法在鞍山式铁矿勘查中的应用——以内蒙古敖汉旗四家子铁矿为例.地球物理学进展,2013,28(4):2078-2084,doi:10.6038/pg20130452.

ZHANG Zhuang, LIU Jian-ming, YU Chang-ming, *et al.* Application of integrated geophysical prospecting methods in the evaluation of BIF deposits-a case study in Inner Mongolia aohanqi sijiazi BIF deposits. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2013, 28(4):2078-2084,doi:10.6038/pg20130452.

综合地球物理方法在鞍山式铁矿勘查中的应用 ——以内蒙古敖汉旗四家子铁矿为例

张 壮^{1,2}, 刘建明^{1*}, 于昌明¹, 曾庆栋¹, 鲍亚军³, 乔爱国³, 牛 默³

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源重点实验室,北京 100029; 2. 中国科学院大学,北京 100049;

3. 赤峰市敖汉旗国土资源局 024300)

摘 要 文章以内蒙古敖汉旗四家子鞍山式铁矿为例,综合运用地面高精度磁测,音频大地电磁测深,重力测量等地球物理测试方法,在已知铁矿和航磁异常的基础上进行资源潜力的快速评价,最终的钻探结果证明:上述方法组合在辽宁西部—内蒙古东南部地区寻找该类铁矿是有效的,能够更好地指导下一步的深部勘查工作。

关键词 鞍山式铁矿,综合地球物理方法,潜力评价

doi:10.6038/pg20130452

中图分类号 P631

文献标识码 A

Application of integrated geophysical prospecting methods in the evaluation of BIF deposits-a case study in Inner Mongolia aohanqi sijiazi BIF deposits

ZHANG Zhuang^{1,2}, LIU Jian-ming^{1*}, YU Chang-ming¹, ZENG Qing-dong¹,

BAO Ya-jun³, QIAO Ai-guo³, NIU Mo³

(1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of
Sciences, Beijing 100029, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Bureau of Land and Resources of Aohanqi, Aohan 024300, China)

Abstract This paper takes aohanqi sijiazi BIF deposit in Inner Mongolia area as an example to show the application of integrated geophysical prospecting methods to the evaluation of BIF deposits, such as the ground high-precision magnetic measurement, control source audio-frequency magnetotelluric, gravity measurement. It has taken a fast evaluation of resource potential base on the already ore deposits and magnetic anomalies, The drilling results show that these above geophysical methods are effective in this exploration in the liaoning west and Inner Mongolia southeast, better guide the next deep exploration.

Keywords BIF deposits, integrated geophysical prospecting methods, potential evaluation

收稿日期 2013-01-24; 修回日期 2013-04-10.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2012CB416605)和国家公益行业专项(201011080)联合资助.

作者简介 张壮,男,1987 年生,中国科学院地质与地球物理研究所硕士研究生,从事金属矿产勘查研究工作.

(E-mail: zhangzhuang2345@163.com)

* 通讯作者 刘建明,男,1958 年生,中国科学院地质与地球物理研究所研究员,主要从事矿床学研究.

(E-mail: jmlu@mail.iggcas.ac.cn)

0 引 言

我国金属与非金属矿物探经过 60 年来的发展,物探方法由 4 种增加至 40 余种.航空物探和区域重力调查基本覆盖了我国陆地面积,并发现了数以千计的金属与非金属矿床.在技术方面,建立起了第二代航空物探系列、地面高精度重力和磁勘查系列、综合电法系列、综合核物探系列以及地下物探和测井系列^[1].

其中磁法勘探在地面、航空与海洋磁测工作方面,磁力仪研制与生产方面,磁异常处理与转换技术方面,磁异常解释理论与方法方面,岩石磁性研究方面,基础地质研究、固体矿产勘查、油气勘查和其他领域中的应用方面取得了很大的进展^[2].重力勘探在区域重力调查、区域构造研究、油气勘探和固体矿产勘探等方面也取得了很大的成就^[3].

然而中国 9600000 km² 的大陆,有近 1/3 的地区为戈壁、沙漠、沼泽、植被等覆盖,很少进行勘查,其余 2/3 地区都经过多种比例尺的调查.有金属矿出露的地点,大多被开发利用.虽然也曾发现像白云鄂博、金川、德兴等大型、特大型矿床,但主要仍是浅层矿.因此,要想解决国民经济建设所需求的金属矿,尤其是铜、金、银、铀等紧缺矿床问题,必须将寻找隐伏的大型、超大型金属矿床作为主要勘探目标,重新思考勘查的思路和方法^[4].

产在前寒武纪古老变质岩系中的沉积变质型铁矿,在我国称为鞍山式铁矿,是全球、也是我国最重要的铁矿工业类型^[5,6].我国的鞍山式铁矿主要产在华北地台 25 亿年前的太古代地层中.其中,著名的鞍山-本溪地区、冀东地区、以及鲁西等地的鞍山式铁矿,由于长期的开采,其资源潜力已经显著降低,目前的勘探和开采都转向了深部.根据最近一轮的找矿成果,在辽宁本溪,冀东,山东济宁等地区深部都相继发现了超大型铁矿床,其中山东济宁的铁矿最深见矿孔达 1800 m 深^[7].

因此,我们把目光投向了辽西-内蒙东部地区大面积出露的太古代变质岩系.在这一带发育大量的航磁异常,而且在地表已经发现了许多小型-中型鞍山式铁矿,也聚集了许多中小型的民采铁矿山.但是,目前的开采深度通常只在地表或地表以下 100~300 m,而且很少有大型-超大型铁矿床的发现和勘探.显然,这为人们留下了巨大的找矿潜力.本文就是我们对内蒙古东部赤峰市敖汉旗太古代地层中鞍山式铁矿的找矿潜力开展地质-地球物理综合研

究的初步总结.

古老的鞍山式铁矿,其原始地质产状是整合层状矿体,但由于我国晚近地质时代强烈的构造和岩浆作用,我国的鞍山式铁矿普遍受到强烈复杂的改造和变形,矿床勘查难度极大.且遭受抬升剥蚀,很难被保留下来.有鉴于此,我们认为,找矿的重点应该放在褶皱向斜鞍部的 U 型部位.在褶皱构造变形过程中,铁矿体通常会在此部位膨大增厚,形成厚大的富矿体.而且,向斜的 U 型部位也最不会被地表抬升剥蚀,因此最有可能被保留下来.实际上,人们从前期找矿经验中已经总结出“向斜控矿”^[8]“复式褶皱控矿”“重磁同源”“航磁,地磁,重力,钻探等方法相结合”等鞍山式铁矿找矿规律.

研究区地表浅部的矿体构造已经显示褶皱控矿的特征,但向地下深部的发展情况不明,尚无任何工程控制,也没有地球物理的测深资料.因此,深部是否赋存有大矿?是否也具有褶皱控矿的特征?向斜核部是否有厚大矿体?针对这一系列问题,我们设计开展了系统的磁法测量、重力测量、电磁测深工作,并进行了初步的钻探工程验证,取得了良好的效果.本文就是这些工作的初步总结,将对我国鞍山式铁矿的深部找矿勘查具有重要的借鉴意义.

1 矿区地质特征

四家子鞍山式铁矿位于华北板块北缘,努鲁儿虎隆起带南西段.区内赋矿地层为太古界建平群小塔子沟组.该组地层是一套中深变质岩系,地层走向总体呈 70°~80°,主体倾向为北北西,倾角 70°~85°.主要岩性为混合岩化黑云斜长片麻岩、角闪黑云斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩、磁铁矿石岩(铁矿层或透镜体)等.构造主要表现为褶皱构造和断裂构造.褶皱构造主体表现为太古界建平群形成的北东东向喀喇沁—王家营子复式向斜的南西段.在该复式向斜中有一系列的走向为 70°~80°的不对称的次一级线状褶皱.复式向斜核部出露建平群大营子组,两翼由小塔子沟组地层组成.矿区位于复式向斜的南东翼.其次区内产出由燕山运动形成的侏罗—白垩纪地层构成的短轴背斜和向斜.

全区已经发现了数以百计、大小不一的铁矿体(图 1).矿体产状与变质岩层顺层整合,属于层状矿体,有多层矿.矿体走向变化较大,但以 30°~75°为主,大多数向南东倾斜,部分向北西倾.倾角变化也很大,从 25°~85°.矿体长度从数十米到数百米,厚度较小,大多在 1~6 m,控制深度很小,仅局部达到

200 m 深.

矿石大多为中-低品位矿石,磁铁矿石品位 10%~30%,矿体品位变化不大.矿体赋存于混合岩化黑云斜长片麻岩中.

矿石主要金属矿物为磁铁矿,少量针铁矿、褐铁矿等.脉石矿物有石英、角闪石、斜长石、绿泥石、黑云母、绢云母等.

2 综合物探工作及结果

2.1 工作思路及技术路线

为了避免地球物理方法的局限性,充分发挥各个方法的优势,本次工作中采用综合地球物理方法^[9-11],综合运用了地面高精磁测、音频大地电磁测深、重力测量等地球物理勘探方法.磁法使用的仪器型号为 GSMP-35 V8.0 钾光泵磁力仪,进行面积性和剖面相结合的方式开展测量.音频大地电磁测深方法使用的仪器为 GDP-32II 多功能电磁仪,是由美国 ZONGE 公司生产,测量频段为 1 Hz ~ 10 kHz,采用矢量测量模式,探测目标深度范围约为 10~2000 m.重力方法使用 LaCoste & Romberg G 型重力仪进行高精度剖面测量,仪器量程:7000 mGal,测量精度 4 μ Gal,读数重复性:10 μ Gal.

本次工作的总体思路是:

1) 结合航磁异常、成矿地质条件、地面矿化显示来筛选工作靶区;

2) 在工作区范围内采用地面高精度磁测进行扫面工作^[12-14];

3) 在地面高精磁测异常的关键部位部署音频大地电磁测深剖面,查明异常在深部的精细电磁结构,尤其是了解地下深部是否有褶皱构造形态;

4) 在电磁异常和地质事实比较吻合的测线上进行重力测量^[15-17],进一步辅助地球物理异常的解释;

5) 结合地质事实,对地球物理异常结果进行综合解释并在最有可能为矿致异常的地段设计验证钻孔,尤其是结合区域地质背景、矿区地质条件和已知矿体特征,增加边界条件以抑制地球物理反演成果的多解性.

地面高精磁测异常的关键部位设计部署了 4 条地球物理测线(图 2),其中 5000 线,3900 线为本次工作的重点.5000 线和 3900 线长分别为 6000 m, 5880 m.测线方向为 135°,点距为 40 m,为了保证定位精度,测量位置通过亚米级差分高精度 GPS 确定.测线布置方向原则上垂直磁异常带的走向.

2.2 地面高精磁测及异常特征

两条测线的 ΔT 磁异常图均显示在 2000 点~4000 点有正的高磁异常(图 3), ΔT 的极大值达到 2500 nT,异常从 2000 点开始由负异常转变为正异常,结合地质情况推测 2000 点的异常转变是由已知铁矿体引起的,4400 点之后异常相对平缓,结合地质事实,这种平缓的磁异常可能为深部矿体的向斜构造引起,但是具体异常来源还需要结合其他地球物理方法来互相验证.

2.3 音频大地电磁测深及异常特征

为了进一步查明地面高精磁异常的来源,及其在深部的形态、产状、规模大小、位置深度等多方面的信息,为钻探工程,尤其是深部钻探工程部署提供依据^[18-21],我们在 5000 线和 3900 线开展音频大地电磁测深工作,测线长度和方位不变.结果显示在测线的 2000 点~3800 点之间在地下深部存在着向斜形态的低阻体(图 3),电阻率与周围地质体存在显著的差异,很可能是层状铁矿体在向斜核部膨大增厚的所致.地下电阻率结构揭示的向斜构造呈多层特征,从浅部向深部大致有三层向斜核部低阻异常:150~200 m 深度的的浅部向形核部,600~800 m 深度的第二层向形核部,1100~1600 m 深度的第三层向形核部.因此初步判断深部存在厚大的矿体,厚大矿体产在向斜核部.

电磁测深结果与地面高精磁扫面和已知地质现象之间具有良好的吻合性,从不同角度证实了高磁异常和低阻异常区为潜在的含矿区^[22],两种异常为矿致异常.低阻异常产状形态与地表出露的矿体和地层的产状、形态、以及多层特征都能吻合,为典型的多级向斜控矿(图 3).

2.4 重力测量和异常特征

在铁矿勘查方法中,重力测量方法为最主要的辅助方法.在已获得的地面磁测异常和深部电磁异常的基础上,进一步开展重力测量^[23,24](图 3),对确定异常性质,区分矿致异常和非矿致异常有着重要的意义.因为 5000 线和 3900 线的地面高精磁异常和电磁测深异常的特征十分相似,所以我们的重力测量工作仅在 5000 线上进行,这样既控制了工作成本,又能很好地快速推测异常性质结果显示:在 5000 线的 2000 点~4000 点存在着较强的重力异常,为异常的峰值区间,该异常位置与磁异常位置大致吻合,也与电磁测深显示的深部向形核部的厚大低阻异常大致吻合,这种“重磁电同现”现象表明该异常极有可能为沉积变质铁矿体引起,进一步验证

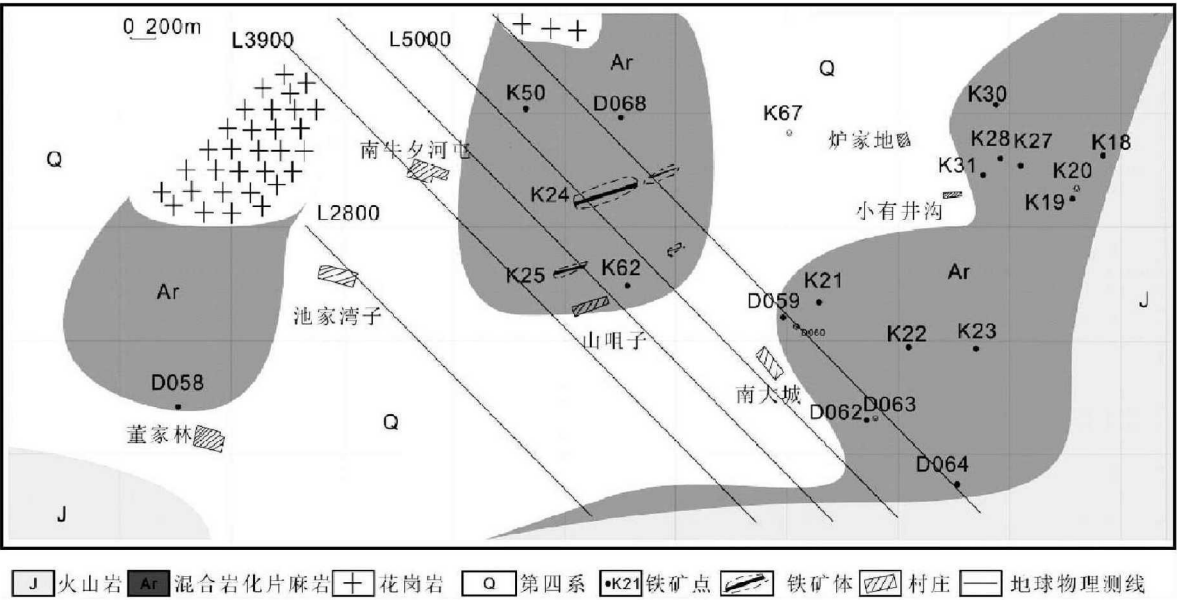


图 1 内蒙古自治区敖汉旗四家子地区地质简图

Fig. 1 Geological map of sijiazzi area aohanqi Inner Mongolia

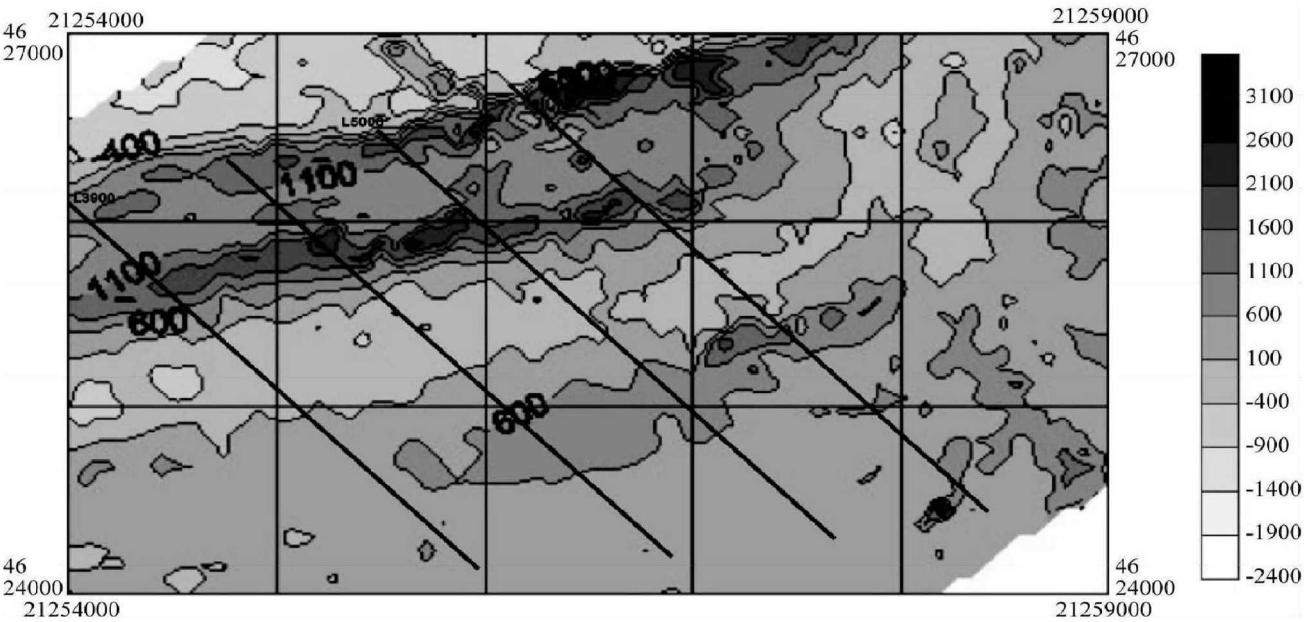


图 2 四家子磁异常等值线与地球物理测量工程布置示意图

Fig. 2 Sijiazzi magnetic anomaly contour and geophysical survey project plan

了该异常确实为矿致异常。

结合矿区的实际地质情况,我们初步判断:上述方法所获得地面磁异常,深部电磁异常,重力异常可能为矿致异常,深部异常形态和位置与已知铁矿体引起的异常形态和位置具有极强的相似性。

3 钻探工程初步验证情况

为了验证上述地球物理异常来源,我们依据多种异常相互叠加、地球物理异常与地质实际情况紧密结合的指导原则,在 5000 线设计了验证钻孔(图

3)。该钻孔的设计目的是揭露从浅部到深部的三层向形核部。如图 3 下部所示,首先揭露 150~200 m 深度的的浅部向形核部,然后揭露 600~800 m 深度的的第二层向形核部,最后是 1100~1300 m 深度的的第三层向形核部,钻孔设计终孔深度为 1600 m。至本文截稿时,钻孔进尺已经达到 860 m,最新的钻孔见矿情况为:200 m 见贫矿,磁铁矿石品位为 10%~25%;642~780 m 见到厚大且品位较高的矿体,累计见矿厚度大于 38 m,磁铁矿石品位为 15%~35%,证实本区地下

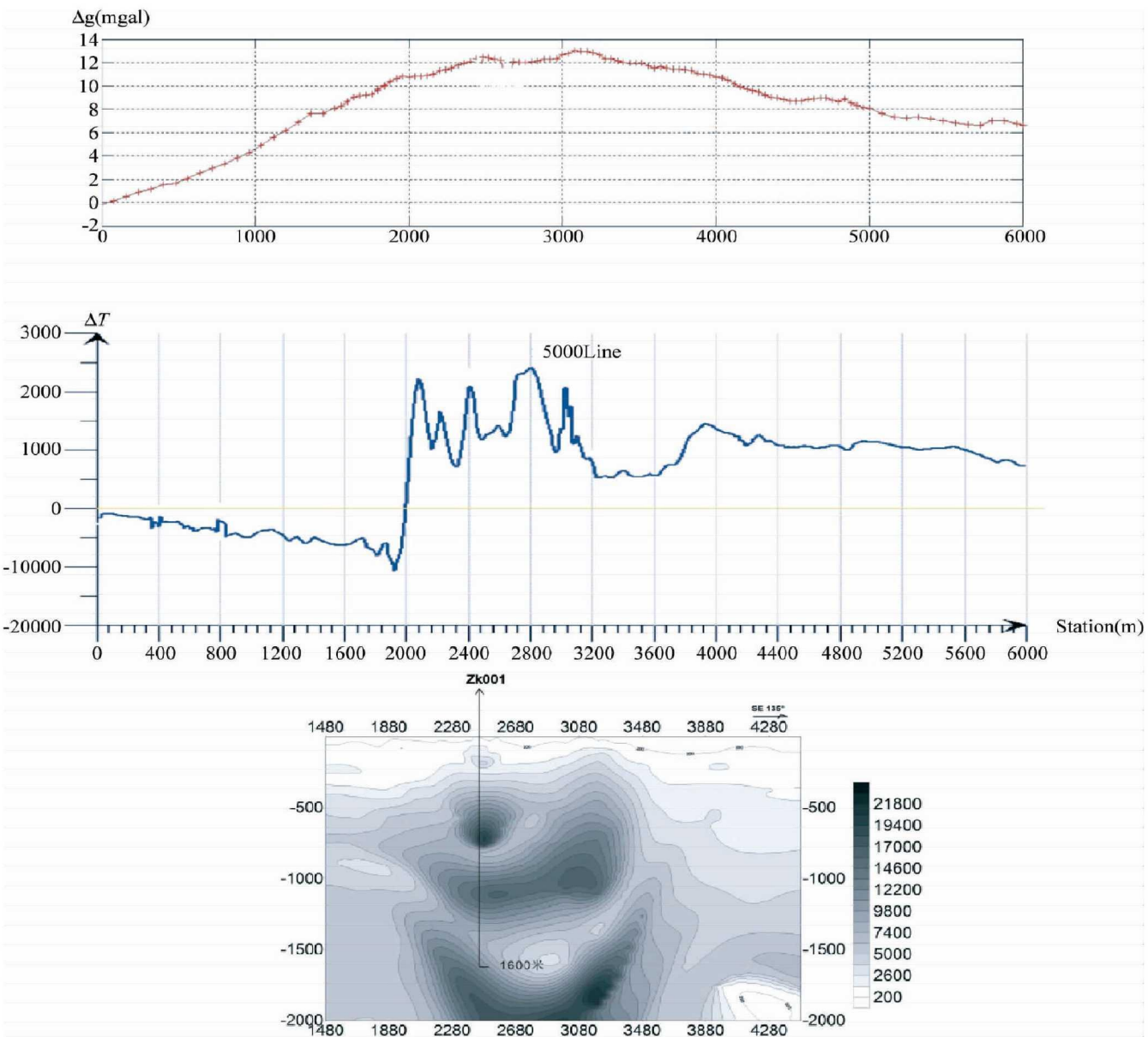


图3 5000线重力布格异常,地面高精磁异常及音频大地电磁测深异常(从上至下)综合图
Fig. 3 The collective diagram(from top to bottom) of bouguer gravity anomaly, the ground high precision magnetic anomaly and audio magnetotelluric sounding anomaly on Line 5000

深部确实存在向形核部的厚大富矿体. 不仅很好地验证了本次工作的地球物理异常,而且证实了向斜核部控矿、本区深部有大矿富矿的地质模型和地质推测.

4 结 论

在内蒙古敖汉旗四家子地区鞍山式铁矿勘查中地面高精磁测,音频大地电磁测深,重力测量等地球物理勘查方法组合是有效的;辽宁西部—内蒙古东南部鞍山式铁矿的勘查模型是地质上具有“向斜控矿”的特点,地球物理异常具有高磁,低阻,高密度的“两高一低”的异常特征.

致 谢 感谢内蒙古自治区赤峰市敖汉旗国土资源局相关领导对本次野外工作的支持,他们的热情帮助是本文研究的重要保障;感谢地球物理学进展编辑部的大力支持,在此一并表示深深的感谢!

参 考 文 献 (References):

[1] 孙文珂,王继伦,齐文秀,等. 我国金属与非金属矿物探的回顾与展望[J]. 地球物理学报,1997,40(S1):351-361.
Sun W K, Wang J L, Qi W X, *et al* . A review and prospects for the geophysical exploration on metallic and nonmetallic deposits in china[J]. Acta Geophysica Sinica, 1997, 40(S1): 351-361.

[2] 管志宁. 我国磁法勘探的研究与进展[J]. 地球物理学报,1997,

- 40(S1):299-307.
- Guan Z N. Researches and progresses on magnetic prospecting in china[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1997, 40(S1):299-307.
- [3] 王懋基,蔡鑫,涂承林. 中国重力勘探的发展与展望[J]. *地球物理学报*, 1997, 40(S1):292-298.
- Wang M J, Cai X, Tu C L. Development and prospect of gravity prospecting in china[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1997, 40(S1):292-298.
- [4] 刘光鼎,郝天珧. 应用地球物理方法寻找隐伏矿床[J]. *地球物理学报*, 1995, 38(06): 850-854.
- Liu G D, Hao T Y. Searching of hidden mineral deposits by geophysical methods [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1995, 38 (06):850-854.
- [5] 沈其韩. 鞍山式铁矿深部找矿整装勘查中应注意的若干问题[J]. *地质学报*, 2012, 86(9):1331-1334.
- Shen Q H. A number of issues that should be noted in An shan Iron deep to exploration [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(9):1331-1334.
- [6] 曹令敏. 地球物理方法在金属矿深部找矿中的应用及展望[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(2): 701-708.
- Cao L M. The application and expectation of the geophysical methods to deep metal mine exploration [J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(2): 701-708.
- [7] 宋明春,李培远,熊玉新,等. 山东省济宁强磁异常区深部铁矿初步验证及其意义[J]. *地质学报*, 2008, 82(9):1286-1291.
- Song M C, Li P Y, Xiong Y X, *et al.* Deep iron deposit of the Jining intense magnetic anomaly area in Shandong province and its significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(9): 1286-1291.
- [8] 董杰,张亚东,李卫东,等. 河北省滦南县司各庄一带重磁场深部找矿信息剖析[J]. *物探与化探*, 2011, 35(5):579-583.
- Dong J, Zhang Y D, Li W D, *et al.* An analysis of prospecting information of the deep gravity and magnetic field in Sigezhuang area, Luannan county, Hebei province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 35(5): 579-583.
- [9] 刘光鼎,郝天珧. 应用地球物理方法寻找隐伏矿床[J]. *地球物理学报*, 1995, 38(6) : 850-854.
- Liu G D, Hao T Y. Searching of hidden mineral deposits by geophysical methods [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1995, 38 (6) :850 -854.
- [10] 孙兴国,李永兵,刘红涛. 综合找矿模型在内蒙古龙头山 Ag-Pb-Zn 多金属矿找矿中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(4): 1326-1333.
- Sun X G, Li Y B, Liu H T. Applying of the integrated mineral deposits prospecting model in Longtoushan Ag-Pb-Zn polymetallic ore deposit, Inner Mongolia [J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(4): 1326-1333.
- [11] 孙燕,刘建明,曾庆栋,等. 综合地球物理方法在某金多金属矿区找矿中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2010, 25(6): 2096-2101.
- Sun Y, Liu J M, Zeng Q D, *et al.* Application of comprehensive geophysical methods in ore prospecting in one Au polymetallic mineralizing area [J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(6): 2096-2101.
- [12] 卢焱,李健,白雪山,等. 地面磁法在隐伏铁矿勘查中的应用——以河北滦平 0 号铁矿为例[J]. *吉林大学学报*, 2008, 38(4): 698-702.
- Lu Y, Li J, Bai X S, *et al.* Application of magnetic survey on hidden iron deposit prospecting case study on Luanping 0 iron deposit in Hebei Province, china [J]. *China Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2008, 38(4):698-702.
- [13] 李富,刘鑫明,廖国忠,等. 地面高精度磁测和电磁测深在矿产调查中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(1):427-433.
- Li F, Liu X M, Liao G Z, *et al.* The application of high precision ground magnetic and electromagnetic sounding in the mineral resources survey [J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(1): 427-433.
- [14] 郭志华,张宝林,祁民,等. 地面高精度磁测在蒙古 13451 矿区地质填图中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(5): 1802-1811.
- Guo Z H, Zhang B L, Qi M, *et al.* The application of high precision ground magnetic prospecting for geological mapping in the 13451 mining area in Mongolia [J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(5): 1802-1811.
- [15] 董英君. 应用重磁方法勘查铁矿的效果——以辽宁建昌县马道铁矿为例[J]. *矿床地质*, 2006, 25(3):321-328.
- Dong Y J. Effects of applying gravity and magnetic method to exploration of iron deposits: Case study of Madao iron deposit in Jianchang county, Liaoning province [J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(3):321-328.
- [16] 傅群和,李朗田,匡清国,等. 鄂东地区金山店铁矿重磁异常特征及资源潜力预测[J]. *地质与勘探*, 2008, 44(3):60-64.
- Fu Q H, Li L T, Kuang Q G, *et al.* Gravity and magnetic abnormality and resource potential prediction in the Jinshandian Fe mine, Eastern Hubei province [J]. *Geology and Prospecting*, 2008, 44(3):60-64.
- [17] 曾琴琴,刘天佑. 重、磁异常的经验模态分解及其在鄂东张福山铁矿勘探中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(4): 1409-1414.
- Zeng Q Q, Liu T Y. EMD of gravity and magnetic anomalies and its application for iron deposit exploration in Zhangfushan, Eastern Hubei [J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(4): 1409-1414.
- [18] 于昌明. 黑岚沟金矿的综合地球物理研究[J]. *地球物理学进展*, 1999, 11(4):114-122.
- Yu C M. The research of exploring gold ore by comprehensive geophysical methods at Helangou [J]. *Progress in Geophysics*, 1999, 11(4):114-122.
- [19] 刘红涛,杨秀瑛,于昌明,等. 用 VLF/EH4 和 CSAMT 方法寻找隐伏矿——以赤峰柴胡栏子金矿床为例[J]. *地球物理学进展*, 2004, 19(2):276-285.
- Liu H T, Yang X Y, Yu C M, *et al.* A case study in finding concealed ores by using geophysical exploration methods in

- combination of VLF- EM, EH 4 and CSAMT [J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(2): 276- 285.
- [20] 张作伦,曾庆栋,于昌明,刘建明. GDP- 32II、EH4 在深部成矿预测中的应用[J]. 地球物理学进展,2010,46(3):470-475.
Zhang Z L, Zeng Q D, Liu J M, *et al.* Application of GDP- 32II and EH4 to prediction of mineralization at depth [J]. Progress in Geophysics, 2010,46(3):470- 475.
- [21] 叶益信,邓居智,李曼,等. 电磁法在深部找矿中的应用现状及展望[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(1): 327-334.
Ye Y X, Deng J Z, Li M, *et al.* Application status and vistas of electromagnetic methods to deep ore prospecting [J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(1): 327-334.
- [22] 孙兴国,刘建明,刘红涛,等. 综合物探方法在好力宝铜矿床的应用[J]. 地球物理学进展,2007,22(6):1910-1915.
Sun X G, Liu J M, Liu H T, *et al.* The application of integrated geophysical prospecting methods to the evaluation of Haolibao copper deposits [J]. Progress in Geophysics, 2007,22(6):1910-1915.
- [23] 施兴,彭朝晖,王德启,等. 重力勘查在寻找铁矿上的应用[J]. 物探与化探,2012,36(2):159-162.
Shi X, Peng Z H, Wang D Q, *et al.* The application of gravity survey to iron deposit prospecting [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(2):159-162.
- [24] 姚绍萍,徐荣华,晏俊灵,等. 重力勘探法在侵入岩体导矿构造上的分析应用[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1679-1686.
Yao S P, Xu R H, Yan J L, *et al.* The application of gravitational method of exploration in analyzing construction of transmissive mine [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(4): 1679-1686.